

Resumen del tercer informe científico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC)

José A. GUIJARRO

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Guijarro, J.A. 2001. Resumen del tercer informe científico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). In: Pons, G.X. i Guijarro, J.A. (Eds.): *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 9: 173-189. ISBN: 84-87818-34-X. Palma de Mallorca.

Se presenta una síntesis del Resumen Técnico del tercer informe científico del IPCC, como primera aproximación al mismo y animando a los lectores a consultar la fuente original. Primeramente, se pasa revista a los cambios observados en el sistema climático, cuyo aspecto más evidente es un aumento progresivo de la temperatura media del aire en la superficie terrestre. Después se discuten las capacidades de los modelos numéricos para simular la evolución del sistema climático, así como para discriminar qué parte del cambio es debido a las actividades humanas. Y por último, se realizan predicciones del clima de los próximos siglos en base a diversas hipótesis de desarrollo económico y emisiones de gases con efecto invernadero, en las que la temperatura media global continuará ascendiendo, con distinto ritmo según los supuestos considerados.

Palabras clave: cambio climático, tercer informe IPCC, forzamientos radiativos, efecto invernadero.

SUMMARY OF THE THIRD IPCC SCIENTIFIC REPORT. An abstract of the Technical Summary of the IPCC third scientific report is presented as a first approximation to it, thereby willing to push readers to consult the original work. Changes observed in the climatic system are first reviewed, their most outstanding feature been the progressive rising of the global mean surface air temperature. Then the abilities of numerical models to simulate the evolution of the climatic system and to attribute part of the changes to human activities are discussed. Last, climate projections for forthcoming centuries are made, based on several scenarios of economic development and greenhouse gases emissions, in which the global mean temperature will keep on rising, but at different rates according to the considered scenarios.

Keywords: climatic change, IPCC Third Report, radiative forcing, greenhouse effect.

RESUM DEL TERCER INFORME CIENTÍFIC DEL PANEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE EL CANVI CLIMÀTIC (IPCC). Es presenta una síntesi del resum tècnic del tercer informe científic del IPCC, com una primera aproximació al mateix i animant als lectors a consultar la font original. Primerament es revisen els canvis observats al sistema climàtic, l'aspecte més evident dels quals és un augment progressiu de la temperatura mitjana de l'aire de la superfície terrestre. Després es discuteixen les capacitats dels models numèrics per a simular l'evolució del sistema climàtic, així com per a discriminar quina part del canvi és degut a les activitats humanes. Finalment es fan prediccions del clima dels pròxims segles basades en diverses hipòtesis de desenvolupament econòmic i emis-

sions de gasos amb efecte hivernacle, als quals la temperatura mitjana global continuarà pujant, amb diferent ritme segons els supòsits considerats.

Paraules clau: canvi climàtic, tercer informe IPCC, forçaments radiatius, efecte hivernacle.

Jose A. GUIJARRO (*pmd@inm.es*). Instituto Nacional de Meteorología; Centro Meteorológico en Illes Balears (*http://www.inm.es/cmt/palm/*) Sección de Estudios y Desarrollos.

Introducción

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en sus siglas inglesas) fue fundado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con objeto de asesorar sobre todos los aspectos del cambio climático, y en particular sobre cómo las actividades humanas pueden inducir dichos cambios y sufrir su impacto.

El IPCC está organizado en tres grupos de trabajo. El grupo I trabaja sobre los aspectos científicos, el II sobre los impactos y adaptaciones al cambio climático, y el III sobre las posibles opciones para mitigar este cambio. Hasta la fecha han publicado tres informes generales, en 1990, 1996 y 2001. Estos informes constituyen recopilaciones puestas al día del conocimiento sobre el sistema climático y factores relacionados, basados en los trabajos y publicaciones de la comunidad científica internacional. Por tanto estos informes son una herramienta indispensable para la toma de decisiones políticas sobre el tema, decisiones que el IPCC deja totalmente en manos de las instituciones competentes.

En el primer informe, el grupo I describió el estado de la comprensión del sistema climático y del cambio climático (cualquiera que sea su origen: natural, o inducido por el hombre) conseguido tras las investigaciones desarrolladas en las décadas anteriores. Los principales puntos fueron:

1. El efecto invernadero es un fenómeno natural en nuestro planeta, y se conoce lo fundamental de sus procesos físicos.

2. Las concentraciones atmosféricas de los gases que producen este efecto invernadero están aumentando, en gran parte debido a las actividades humanas.

3. Se puede predecir que un continuado aumento de estos gases en el futuro conducirá a aumentos significativos en la temperatura media superficial del planeta, aumentos que sobrepasarán a los que se han dado de modo natural en los últimos milenios, y que sólo podrían corregirse muy lentamente.

4. En ese momento se había observado un calentamiento superficial de casi 0,5°C, *grosso modo* consistente con las predicciones de los modelos climáticos, pero también comparable con las variaciones naturales conocidas.

5. Finalmente, se señaló que el nivel de conocimientos y las capacidades de los modelos climáticos en ese momento limitaban la validez de las predicciones de cambios en el clima de regiones concretas.

Tras la actividad científica desarrollada en los años siguientes, el grupo I del IPCC publicó su segundo informe en 1996. En él se subrayó que las concentraciones de gases invernadero continuaban aumentando en la atmósfera, y que harían falta recortes muy substanciales en sus emisiones para estabilizar dichas concentraciones. Es más, el aumento de la temperatura global continuaba, siendo los años recientes los más cálidos desde 1860. La capacidad de los modelos climáticos para simular los efectos observados y sus tendencias había mejorado, pero de la comparación de los pronósticos con los cambios de temperatura observados a escala regional se dedujo que la capacidad para

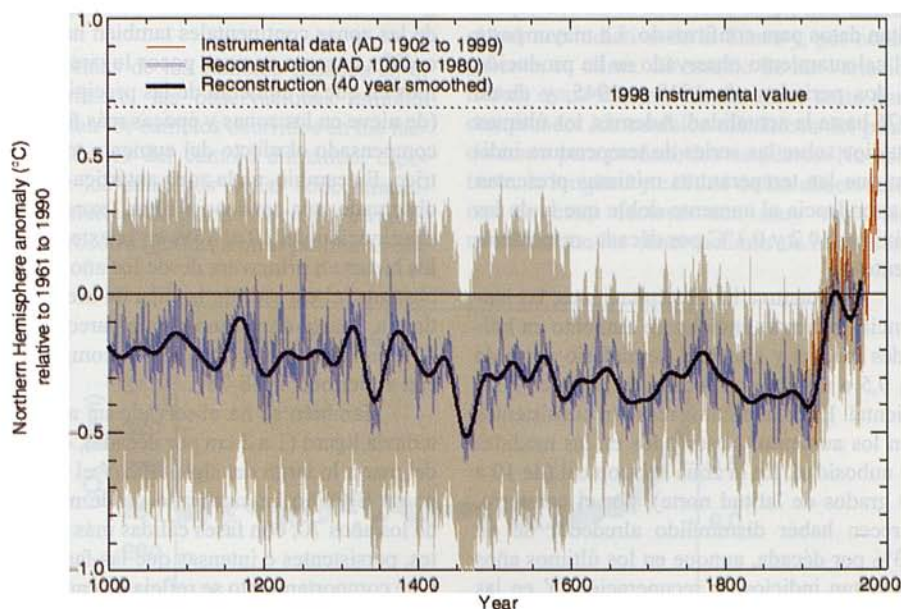


Fig. 1. Reconstrucción de las temperaturas medias del hemisferio norte durante el último milenio (en azul; en negro, versión suavizada; en gris, intervalo de confianza del 95%; y en rojo, datos instrumentales del último siglo). (Según IPCC, 2001).

Fig. 1. Millennial Northern Hemisphere temperature reconstruction (blue; smoother version in black; 95% confidence interval in gray; and instrumental data from the last century in red). (After IPCC, 2001).

cuantificar la influencia humana en el clima global era limitada. Estas limitaciones se debían a que la señal esperada todavía no destacaba claramente de la variabilidad natural, y por incertidumbres en otros factores clave. Sin embargo, el informe concluyó también que el conjunto de las evidencias insinuaba una clara influencia humana sobre el clima global. Por último, y basándose en una serie de supuestos sobre futuras concentraciones de gases de efecto invernadero, se simuló un conjunto de posibles respuestas del sistema climático.

El tercer informe del grupo I del IPCC (2001) se basa en las afirmaciones anteriores e incorpora los resultados de los cinco últimos años de investigación climática, que se resumen en los siguientes apartados.

Cambios observados en el sistema climático

Es innegable que el clima ha cambiado en el pasado, pues así lo indican tanto las series de medidas climatológicas, iniciadas a mediados del siglo XIX, como los registros obtenidos de los árboles, corales, sedimentos, y capas de hielo, que nos aportan datos sobre el clima de siglos y milenios pasados (Fig. 1).

Los registros termométricos nos indican que la temperatura media de la superficie ha aumentado $0,6^{\circ}\text{C}$ desde finales del siglo XIX (con un intervalo de confianza del 95% de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). La década de los años 90 ha sido la más cálida, y el año 1998 el más cálido, desde que se iniciaron las medidas y, muy probablemente, de todo el último milenio (Fig. 1), al menos en el hemisferio norte. Esto

también puede ser cierto para el hemisferio sur e incluso para milenios anteriores, pero faltan datos para confirmarlo. La mayor parte del calentamiento observado se ha producido en dos periodos: de 1910 a 1945, y desde 1976 hasta la actualidad. Además, los últimos estudios sobre las series de temperatura indican que las temperaturas mínimas presentan una tendencia al aumento doble que la de las máximas (0,2 y 0,1°C por década, respectivamente).

En cuanto a las precipitaciones, las tendencias recientes indican un aumento en latitudes medias y altas del hemisferio norte de un 0,5 a un 1% por década, excepto en Asia oriental. Estos aumentos resultan consistentes con los aumentos observados en las medidas de nubosidad. En la zona subtropical (de 10 a 30 grados de latitud norte), por el contrario, parecen haber disminuido alrededor de un 0,3% por década, aunque en los últimos años presentan indicios de recuperación. Y en las zonas tropicales (± 10 grados de latitud), las medidas de los observatorios terrestres presentan un aumento de 0,2 a 0,3% por década a lo largo del siglo XX, si bien en las últimas décadas el aumento ya no resulta tan evidente. En el hemisferio sur no se ha encontrado evidencia de cambios en la precipitación similares a los del hemisferio norte.

También se ha observado un aumento de la cantidad de vapor de agua en muchas regiones del hemisferio norte. Dicho aumento se puede cifrar en alrededor de un 10% por década desde que se iniciaron las observaciones en 1980. La nubosidad, por su parte, parece haber aumentado alrededor de un 2% durante el siglo XX, presentando una correlación positiva con la disminución de la oscilación diaria de temperatura. Estas variaciones se han observado en las regiones continentales de latitudes medias y altas del hemisferio norte y en Australia, mientras que en las zonas oceánicas y en las terrestres tropicales y subtropicales los estudios realizados hasta ahora presentan resultados inciertos.

La elevación de temperaturas ha llevado a una disminución de las áreas cubiertas de hielo de un 10% en el hemisferio norte desde

finales de los años 60, según revelan las imágenes tomadas desde satélites. Los glaciares de las zonas continentales también han retrocedido, excepto en unos pocos lugares marítimos en que el aumento de las precipitaciones (de nieve en las zonas y épocas más frías) han compensado el efecto del aumento termométrico. En cambio, en la zona antártica no se ha observado una tendencia clara, excepto una disminución del 10 al 15% en la extensión de los hielos en primavera desde los años 50. No obstante, el espesor de la capa de hielo marítima a finales de verano sí que parece ser un 40% inferior en los años 90 en comparación con el periodo 1958-76.

También se ha observado un aumento, todavía ligero (1 a 2 cm por década), del nivel del mar a lo largo del siglo XX. Y el fenómeno de El Niño ha cambiado desde mediados de los años 70, con fases cálidas más frecuentes, persistentes e intensas que las fases frías. Este comportamiento se refleja en cambios de precipitación y temperatura en gran parte de las zonas tropicales y subtropicales.

Aparte de los cambios en los valores medios de la precipitación, se ha detectado un aumento en la frecuencia de episodios de precipitaciones abundantes (de un 2 a un 4% más), generalmente en zonas en las que los promedios han aumentado, pero también en otras en las que han disminuido o no han variado apreciablemente. En cuanto a la falta de precipitaciones, a nivel global el aumento de zonas que experimentan sequías fuertes ha aumentado relativamente poco, aunque en algunas áreas de Asia y África sí que se ha observado una mayor frecuencia e intensidad de las sequías en las últimas décadas.

Otros fenómenos de tiempo adverso, como tormentas tropicales, ciclones extratropicales, tormentas, granizo, tornados, etc, resultan difíciles de estudiar por su escasa frecuencia y elevada variabilidad espacial. Algunos trabajos apuntan a una mayor frecuencia en el Pacífico septentrional y zonas de Norteamérica y Europa en las últimas décadas, pero no son concluyentes en cuanto a señalar tendencias estables de variación a largo plazo.

Factores causantes del cambio climático

Además de los cambios pasados en el clima terrestre, las observaciones también documentan los cambios ocurridos en los factores causantes del cambio climático, especialmente los aumentos en las concentraciones atmosféricas de gases con efecto invernadero y aerosoles (gotitas u otras partículas que

se mantienen en suspensión en el aire) y las variaciones en la actividad solar, que alteran el balance radiativo de la Tierra y, por consiguiente, su clima. El estudio de las variaciones de estos factores resulta clave tanto para comprender los cambios climáticos del pasado como para predecir los venideros. No obstante, la longitud y calidad de las observaciones de estos factores son muy variables: mientras que las observaciones de la concen-

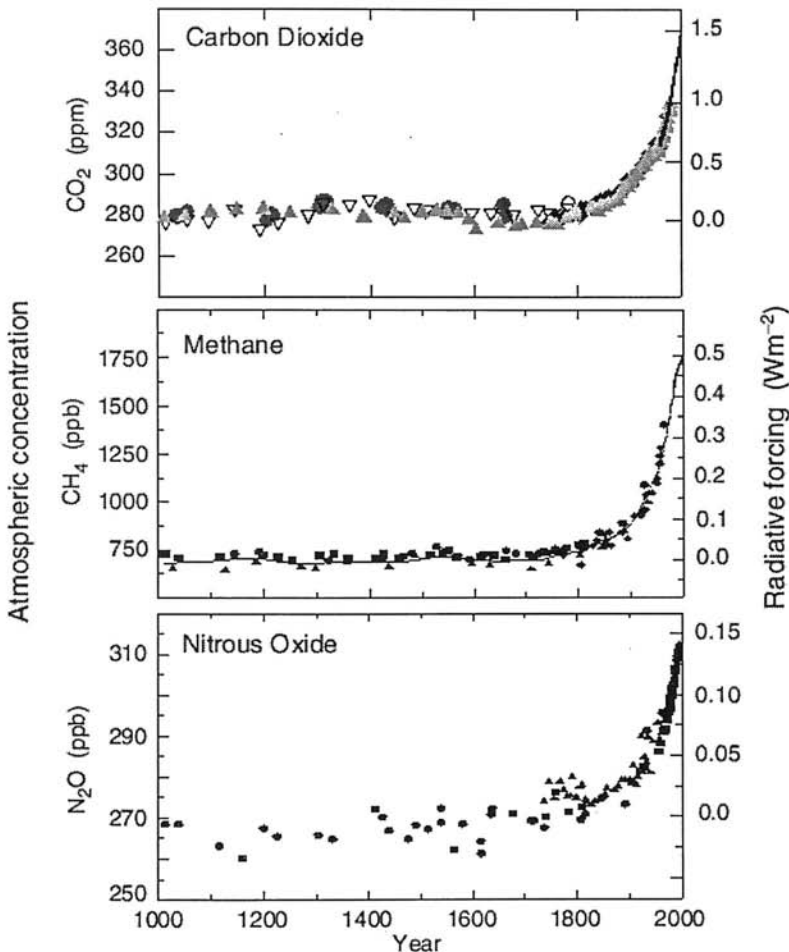


Fig. 2. Concentraciones atmosféricas de CO₂, CH₄ y N₂O durante el último milenio. La escala de la derecha muestra los forzamientos radiativos estimados para estos gases. (Según IPCC, 2001).

Fig. 2. Atmospheric concentrations of CO₂, CH₄ and N₂O over the past 1000 years. The estimated radiative forcing from these gases is indicated on the right-hand scale. (After IPCC, 2001).

tración de dióxido de carbono (CO_2) empezaron hacia mediados del siglo XX, las de otros gases (como el metano) o los aerosoles se iniciaron más recientemente. Y, por otra parte, en profundos sondeos efectuados en el hielo se pueden estudiar los cambios de algunos gases con efecto invernadero a lo largo de varios milenios.

Las variaciones en la energía disponible para el sistema global Tierra-atmósfera debidos a cambios en estos factores se denominan forzamientos radiativos del sistema climático, y se cuantifican en W/m^2 . En la Fig. 2 se observa cómo se han incrementado estos forzamientos desde el inicio de la Era Industrial.

El CO_2 se ha incrementado desde las 280 ppm (partes por millón) del año 1750 hasta 367 ppm en 1999 (un 31%). La actual concentración de este gas nunca había sido superada en los últimos 420000 años, y probablemente tampoco en los últimos 20 millones de años. La composición isotópica del CO_2 y la disminución del oxígeno demuestran que este aumento es debido en su mayor parte a la oxidación de carbono orgánico por la quema de combustibles fósiles y la deforestación.

Las concentraciones de metano atmosférico han aumentado alrededor de un 150% desde 1750, y sus concentraciones actuales tampoco se habían superado en los 420000 años anteriores. Aunque su concentración sigue subiendo actualmente (1,610 ppm en 1983 y 1,775 en 1998), el ritmo de aumento se ha reducido en los últimos años. Este gas se produce de forma natural y también debido a las actividades humanas, responsables de algo más de la mitad de las cantidades liberadas a la atmósfera. Aunque su concentración actual es bastante inferior a la del CO_2 , su forzamiento radiativo supone un 20% del total de los gases con efecto invernadero. Sin embargo, la predicción de las futuras concentraciones de metano resulta muy problemática, por depender de procesos que pueden verse afectados por el propio cambio climático.

El óxido nitroso (N_2O) también ha ido aumentando de forma constante a lo largo de la Era Industrial, de modo que su concentración actual, 0,046 ppm, es un 16% mayor que la de 1750, y tampoco había sido superada en los últimos millares de años. Este gas también se origina tanto por la actividad del hombre como por procesos naturales y, al igual que el metano, se degrada en la atmósfera mediante reacciones químicas. Actualmente contribuye con un 6% al forzamiento radiativo, y su evolución futura también es difícil de predecir.

Las concentraciones atmosféricas de los halocarbonos y compuestos relacionados, gases formados por carbono y halógenos (flúor, cloro, bromo y yodo) que contribuyen al efecto invernadero además de destruir la capa de ozono, están decreciendo actualmente gracias a la reducción de emisiones acordada en el Protocolo de Montreal y sus modificaciones. La única excepción la constituye el CFC-12, que sigue aumentando, aunque más lentamente que antes. Su contribución actual al forzamiento radiativo de todos los gases con efecto invernadero es de un 14%. Los substitutos de estos compuestos (hidroclorocarbonos y hidroclorofluorocarbonos) están aumentando, y algunos de ellos también presentan efecto invernadero, pero su concentración es todavía muy baja y su contribución al forzamiento radiativo relativamente pequeña. Además, su liberación a la atmósfera también está limitada por el Protocolo de Montreal.

Otros gases de origen antropogénico, como los perfluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre, permanecen en la atmósfera durante periodos extremadamente largos, y pueden influir en el clima del futuro incluso con emisiones relativamente pequeñas.

El ozono, por su parte, juega un papel diferente según la altitud a la que se halle, pues está presente tanto en la estratosfera como en la troposfera. Así, la disminución de la capa de ozono estratosférica ha causado un forzamiento radiativo negativo (un enfriamiento de la troposfera) de unos $0,5 \text{ W/m}^2$, que contrarresta parte del efecto invernadero de los demás gases y, particularmente, del metano, cuya velocidad de destrucción debe

de ser mayor de la normal por la mayor cantidad de radiación ultravioleta que llega a la troposfera con una capa de ozono debilitada. En cambio, el aumento del ozono troposférico desde la época preindustrial ha producido un incremento del efecto invernadero estimado en unos $0,35 \text{ W/m}^2$, lo que convierte al ozono de las capas bajas en el tercer gas en importancia por su contribución a este efecto, tras el CO_2 y el CH_4 . El ozono no se emite directamente, sino que se forma por reacciones fotoquímicas, cuya evolución futura vendrá determinada por las emisiones de metano y otros gases, entre otros factores.

Algunos otros gases ejercen una influencia indirecta sobre el forzamiento radiativo. Tal es el caso de algunos óxidos de nitrógeno reactivos (NO_x), del monóxido de carbono (CO) y de los compuestos orgánicos volátiles, que controlan en parte la capacidad oxidante de la troposfera, así como la abundancia de ozono.

En cuanto a los aerosoles, se sabe que tienen una gran influencia en el balance energético de la Tierra, tanto directamente, por absorber y dispersar las radiaciones visibles e infrarrojas, como de modo indirecto, al modificar la cantidad y propiedades radiativas de las nubes. Se producen por procesos naturales y por actividades humanas (principalmente la quema de combustibles fósiles y biomasa), y su distribución es muy heterogénea, con tiempos de permanencia en la atmósfera de alrededor de una semana (son lavados por la precipitación). Sus efectos dependen mucho de su composición y del tamaño de sus partículas, por lo que son difíciles de evaluar, pero se estima que los sulfatos producen un forzamiento radiativo de unos $-0,4 \text{ W/m}^2$, las partículas procedentes de la quema de biomasa unos $-0,2 \text{ W/m}^2$, y de $-0,1$ a $+0,2 \text{ W/m}^2$ las de los combustibles fósiles (según el tipo de éstos).

Aparte de los efectos debidos a los gases de efecto invernadero y aerosoles, otros factores a considerar son las variaciones en el albedo de la Tierra (fracción de la energía solar que es reflejada de nuevo hacia el espacio), la irradiancia solar y la actividad volcá-

nica. Así, los cambios en el uso del suelo (principalmente la deforestación) parecen haber producido un forzamiento radiativo de unos $-0,2 \text{ W/m}^2$. La radiación solar que llega a nuestro planeta se estima que ha aumentado ligeramente desde 1750, principalmente en la primera mitad del siglo XX, produciendo un forzamiento de $0,1$ a $0,5 \text{ W/m}^2$, pero las cenizas inyectadas en la estratosfera por las erupciones volcánicas explosivas de 1880-1920 y 1960-1991 compensaron este forzamiento con una contribución negativa.

Simulación del sistema climático y sus cambios

Para simular la evolución del sistema climático se emplean modelos numéricos, pues la complejidad de los procesos implicados hace que no sean válidas técnicas puramente estadísticas que extrapolen al futuro las tendencias observadas hasta ahora. Hay modelos sencillos que permiten estimar valores medios globales de algunas variables, pero para evaluar mejor los procesos de retroalimentación y los detalles a nivel regional se necesitan modelos mucho más elaborados, basados en un conocimiento lo más completo posible de los procesos físicos, geofísicos, químicos y biológicos que gobiernan el sistema climático.

Los procesos de retroalimentación son muy importantes para estimar la evolución del clima bajo diferentes supuestos de concentraciones de gases con efecto invernadero. El paradigma lo constituye el vapor de agua, pues un aumento en la temperatura media de la troposfera aumenta la capacidad de la misma para contener vapor de agua en su seno, y el vapor de agua es también un gas con efecto invernadero, con lo que un aumento en su concentración contribuirá a un incremento adicional de la temperatura (retroalimentación positiva). Las últimas valoraciones realizadas por los modelos indican que este efecto de retroalimentación del vapor de agua duplica el incremento de temperatura que se obtendría si no se tuviera en cuenta.

Sin embargo los cambios en la cantidad y distribución vertical del vapor de agua inducirán también cambios en la nubosidad, y las nubes son, como ya puso de manifiesto el IPCC en su primer informe en 1990, el factor que más incertidumbre introduce en las previsiones del clima del futuro. Esto es debido a que las nubes absorben y reflejan la radiación solar incidente (forzamiento radiativo negativo), pero también absorben y emiten radiación infrarroja (forzamiento positivo). Y que predomine uno u otro efecto depende del tipo de nubosidad, su espesor, su altura, y otras propiedades físicas (distribución y tamaños de las gotitas y cristales de hielo, presencia de aerosoles, etc).

La estratosfera está ganando importancia en la simulación de los procesos radiativos y dinámicos de la atmósfera, por lo que habrá que mejorar su representación en los modelos.

La modelización de los procesos oceánicos han mejorado mucho, sobre todo en lo que respecta al transporte de calor que, junto con un aumento en la resolución, han permitido una simulación más realista de las circulaciones a gran escala y del fenómeno de El Niño. Su importancia en la modelización del sistema climático es muy grande, ya que las enormes masas oceánicas actúan ralentizando las variaciones climáticas por su gran capacidad para almacenar e intercambiar calor, vapor de agua y CO₂ con la atmósfera.

La representación de los procesos del hielo marino continua mejorando, de forma que varios modelos climáticos incorporan ya una dinámica del hielo con base física. Su importancia radica en que el hielo aumenta la reflectividad (albedo) de la superficie marina al tiempo que la aísla, disminuyendo la pérdida de calor en invierno. Además, cuando se forma el hielo aumenta la salinidad (y densidad) del agua subyacente, lo que induce el intercambio de agua con capas más profundas y afecta a la circulación oceánica. En comparación con la del hielo marino, la simulación de los procesos que involucran al hielo continental todavía es algo rudimentaria, por lo que se trabaja en su mejora.

Las investigaciones con modelos que incorporan los últimos avances en la simulación de los procesos de la superficie terrestre indican que un aumento en la concentración del CO₂ produce un cambio en la fisiología de las plantas que conduce a una reducción en la evapotranspiración en las zonas tropicales continentales, con el consiguiente calentamiento y mayor sequedad en comparación con las predicciones de modelos anteriores. Los cambios que puede sufrir la superficie terrestre (no acuática) debido a cambios en la temperatura, precipitación, balance energético y efectos directos del CO₂ suponen todo un abanico de posibles efectos de retroalimentación, al influir en propiedades clave como la humedad del suelo, su albedo, rugosidad y vegetación que puede soportar.

En cuanto a la simulación del ciclo del carbono, sus últimas mejoras aumentan la confianza en las estimas de las concentraciones que puede alcanzar el CO₂ en el futuro. De hecho, el CO₂ sufre un proceso de reciclaje natural bastante rápido, pero el aumento de las emisiones a la atmósfera por las actividades humanas no puede ser absorbido por los océanos y la superficie terrestre con suficiente rapidez. El CO₂ es bastante soluble en agua, pero la velocidad de su absorción por los océanos está limitada por los procesos verticales de mezcla. Y en tierra, los ecosistemas absorben el CO₂ mediante la fotosíntesis de las plantas, que aumenta su eficiencia al aumentar la propia concentración de este gas, pero sólo una fracción relativamente pequeña de los hidratos de carbono sintetizados puede quedar almacenado en forma de madera o humus en lugar de volver a la atmósfera por otros procesos (respiración vegetal, descomposición de la hojarasca y demás materia orgánica en el suelo, ingestión por herbívoros, etc). La complejidad de todas estas interacciones hace que todavía haya diferencias apreciables entre los diferentes modelos, pero en lo que coinciden todos es en que, debido a los efectos del cambio climático, la proporción de CO₂ que tierras y océanos podrán absorber en el futuro será cada vez menor.

Los modelos que tratan los distintos subsistemas (atmósfera, océanos, etc.) del sistema climático de modo acoplado ponen de manifiesto nuevas retroalimentaciones importantes para la predicción de respuestas a largo plazo. Así, cada vez es más evidente que los patrones naturales de circulación, como ENSO y NAO, juegan un papel fundamental en el clima global y sus variabilidades interanuales y de plazos más largos, mientras que la circulación termohalina (corrientes oceánicas de diferente densidad, ligadas a variaciones de temperatura y salinidad) son responsables de la mayor parte del intercambio meridiano de calor en el agua del mar.

La complejidad de todas estas interacciones, no lineales la mayoría de ellas, supone la posibilidad de que, forzando suficientemente el sistema climático, se pueda llegar a cruzar algún tipo de umbral que haga que el sistema cambie rápida e irreversiblemente (en unas pocas décadas) a un nuevo estado de equilibrio relativo, distinto del actual. (Se supone que la rápida aparición del Sáhara hace unos 5500 años pudo deberse a una de estas transiciones).

También se ha mejorado en la apreciación del cambio climático a escala regional, mediante modelos de resolución variable (mayor en la región a estudiar), modelos regionales anidados (reciben las condiciones de contorno de un modelo global), o métodos estadísticos (empíricos o dinámicos). Cada una de estas técnicas presenta sus ventajas e inconvenientes, y deben aplicarse en función de las necesidades concretas de cada caso. Sin embargo, a pesar de estas mejoras, los márgenes de error a escala regional todavía son demasiado grandes, con desviaciones de unos modelos a otros de 2 a 4°C en temperaturas y del orden del 50% en precipitaciones.

Todo esto nos indica que queda todavía mucho por hacer en el campo de la simulación numérica del sistema climático, pero que con los avances logrados hasta ahora ya se pueden obtener valoraciones bastante fiables, sobre todo a nivel global. Esto se pone de manifiesto en los proyectos de intercomparación de modelos, en los que se han obtenido simula-

ciones del clima del pasado (del Holoceno medio, hace unos 6000 años, y del último máximo glacial, 21000 años atrás) bastante concordantes con los datos disponibles de esas épocas.

Identificación de la influencia humana en el cambio climático

Tras haber caracterizado los cambios del clima del pasado y los agentes causantes de los mismos, así como las capacidades actuales de los modelos en simular dichos cambios, cabe preguntarse hasta qué punto puede discriminarse la influencia humana en el cambio climático. Llegados a este punto es conveniente distinguir entre la detección del cambio climático, consistente en demostrar que un cambio observado es significativamente (en sentido estadístico) diferente de lo que podría explicarse por la variabilidad natural, y su atribución, que trata de establecer la conexión causa-efecto de dicho cambio, con determinado nivel de confianza, e incluyendo posibles alternativas.

Debido a la variabilidad natural del clima, la detección del cambio climático se convierte en un típico problema estadístico de relación señal-ruido. Los estudios de detección tratan de establecer si un cambio observado es muy inusual en términos estadísticos, pero eso no implica necesariamente que se comprendan sus causas. La atribución de ese cambio a causas antropogénicas precisa tanto de análisis estadísticos como de cuidadosas valoraciones, contemplando diversas hipótesis, que demuestren, con un determinado margen de error, que es improbable que el cambio sea debido solamente a la variabilidad interna, que es consistente con las respuestas esperables debidas a los forzamientos naturales y antropogénicos, y que en cambio no es consistente con otras explicaciones alternativas, físicamente posibles.

En este sentido, el calentamiento observado en los últimos 100 años es muy improbable que pueda ser debido únicamente a la variabilidad climática, tanto si observamos las

reconstrucciones del clima del pasado (incluso con sus márgenes de error) como si realizamos comparaciones con pasadas de control de los modelos climáticos. Y cada vez hay mejores concordancias entre los cambios observados y las respuestas de los modelos a forzamientos antropogénicos (Fig. 3), y se pone de manifiesto que esta influencia humana es necesaria para explicar las tendencias observadas durante al menos los últimos 30 años.

Hay que señalar que todavía quedan por resolver discrepancias de los modelos con las observaciones, principalmente en lo que respecta al perfil vertical de temperatura en la troposfera y a la variabilidad interna del clima. Otro tipo de incertidumbres son las debidas a la dificultad de obtener datos fiables del pasado, como en el caso de los forzamientos debidos a la actividad solar o las erupciones volcánicas, o la simulación del efecto de los aerosoles antropogénicos. Pero a pesar de estas incertidumbres, la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se debe probablemente al aumento en las concentraciones de los gases con efecto invernadero.

El clima de la Tierra en el futuro

En 1996, el IPCC comenzó a desarrollar un nuevo conjunto de hipótesis de emisiones futuras de gases, para poner al día y substituir las que se usaban anteriormente (IS92), basadas en posibles evoluciones mundiales de variables demográficas, económicas y tecnológicas, que se aprobaron en un informe especial (*IPCC Special Report on Emission Scenarios*, o SRES) en marzo de 2000. Se formularon 40 hipótesis diferentes, agrupadas en 4 familias, que se describen brevemente a continuación.

A1. Se supone un crecimiento económico muy rápido, con una población mundial que alcanza un máximo a mediados de siglo para descender posteriormente, y una rápida disponibilidad de tecnologías más eficientes.

También se supone una creciente convergencia entre las distintas regiones del mundo, con intensas interacciones culturales y sociales, y reducción substancial de diferencias en la renta per cápita.

A2. Aquí se supone un mundo muy heterogéneo, con autosuficiencia y preservación de las identidades locales, y una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico y el cambio tecnológico es más lento y menos generalizado que en los otros grupos de hipótesis.

B1. Hipótesis similares a las de A1, pero con un cambio muy rápido hacia una economía de servicios e información, con menor consumo de materias primas e introducción de tecnologías limpias y eficientes. Se enfatiza la sostenibilidad económica, social y ambiental, incluyendo una mayor equidad.

B2. Se describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a los problemas de sostenibilidad. La población mundial aumenta de modo continuo, pero a un ritmo inferior al de A2, con niveles intermedios de desarrollo económico y un cambio tecnológico más lento y diversificado que en A1 y B1.

Los modelos indican que las diferentes hipótesis consideradas conducen a concentraciones de CO₂ muy diferentes en el futuro (de 540 a 970 ppm en el año 2100, es decir, un 90 a 250% más que las 280 ppm de 1750). Se podrían tomar medidas para aumentar la retención de CO₂ atmosférico en ecosistemas terrestres, pero como máximo (regenerando todos los bosques destruidos por el hombre) se podría reducir su concentración entre 40 y 70 ppm. Por tanto, las emisiones de CO₂ debidas a la quema de combustibles fósiles serán el factor que condicionará las concentraciones de este gas en el presente siglo.

Las concentraciones de otros gases invernadero distintos al CO₂ también varían mucho de unas hipótesis a otras, y otro tanto sucede con gases con efecto invernadero indirecto. Bajo algunas hipótesis, el resultado es un ambiente degradado con consecuencias

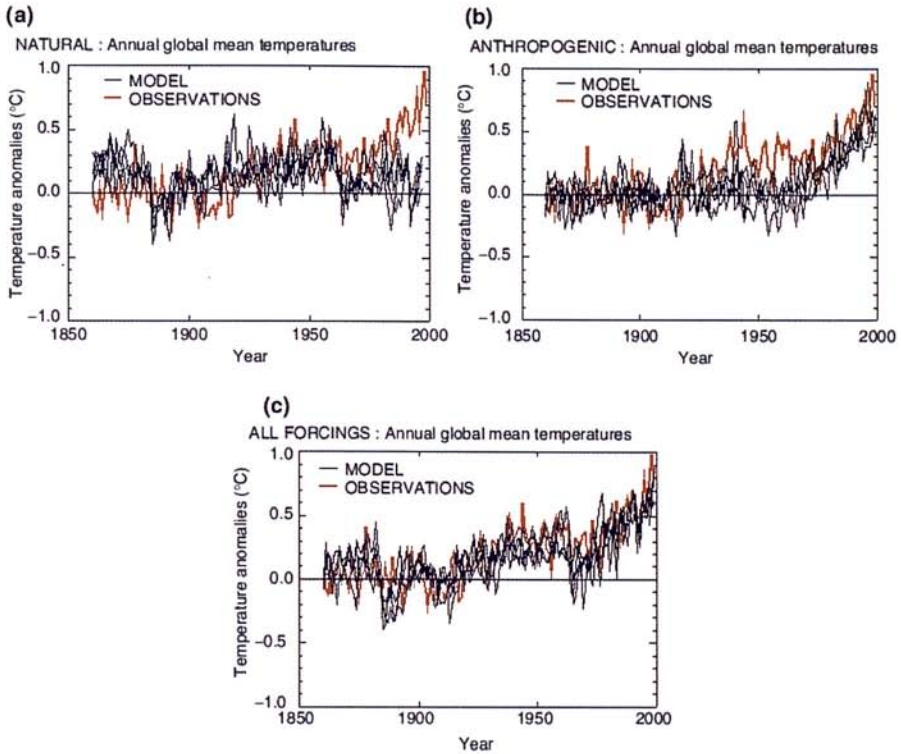


Fig. 3. Anomalías de la temperatura superficial media global, relativas al promedio de 1880-1920, de los registros instrumentales, comparadas con conjuntos de cuatro simulaciones realizadas con un modelo acoplado océano-atmósfera con: (a) forzamientos solar y volcánico solamente; (b) forzamientos antropogénicos, incluyendo gases invernadero, ozono estratosférico y troposférico, y efectos indirectos de aerosoles sulfato; y (c) todos los forzamientos, tanto naturales como antropogénicos (según IPCC, 2001).

Fig. 3. Global mean surface temperature anomalies relative to the 1880 to 1920 mean from the instrumental record compared with ensembles of four simulations with a coupled ocean-atmosphere climate model forced (a) with solar and volcanic forcing only, (b) with anthropogenic forcing including well mixed greenhouse gases, changes in stratospheric and tropospheric ozone and the direct and indirect effects of sulphate aerosols, and (c) with all forcings, both natural and anthropogenic (after IPCC, 2001).

negativas que no se limitan al cambio climático (aumento de la polución atmosférica por ozono, por ejemplo). Y la abundancia de aerosoles, con excepción de los sulfatos y hollines, muestran una relación aproximadamente lineal con los niveles de emisión. (Los aerosoles naturales pueden aumentar como resultado de los cambios en el clima y la química atmosférica).

En la Fig. 4 se representan los forzamientos radiativos previstos por los modelos

para las diferentes hipótesis consideradas. Hay tres supuestos del grupo A1, que se diferencian por emplear preferentemente combustibles fósiles (A1FI) o energías renovables (A1T), o bien una mezcla de ambos (A1B). (Entre algo más de la mitad y tres cuartas partes del forzamiento radiativo de las diferentes hipótesis es debido al CO₂). Se incluyen también, como comparación, tres de las anteriores hipótesis de emisiones (IS92a, c y e), que daban previsiones más bajas principalmente

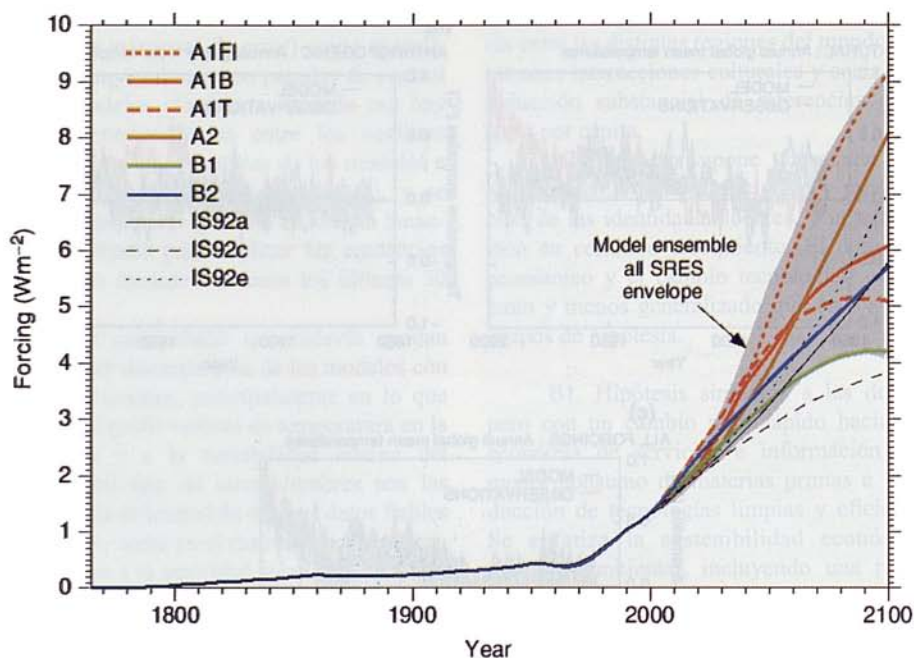


Fig. 4. Forzamientos radiativos antropogénicos históricos y sus estimas futuras bajo distintas hipótesis de emisiones. (Según IPCC, 2001).

Fig. 4. Historical anthropogenic radiative forcing and its future projection for different emission scenarios. (After IPCC, 2001).

porque no contemplaban la reducción de emisiones de SO₂ resultado de las políticas de mejora de la calidad del aire.

Como resultado de estos forzamientos, los modelos prevén un aumento de la temperatura del aire mayor sobre tierra firme que sobre los océanos, sobre todo en latitudes altas del hemisferio norte, y también más notable en invierno que en verano. La oscilación termométrica diaria tenderá a disminuir en muchas zonas, de forma que los ascensos de temperatura serán más acusados en las mínimas nocturnas que en las máximas diurnas. Las previsiones para finales de siglo (2071-2100) indican que, con el conjunto de hipótesis A2 sobre emisiones de gases, la temperatura media global del aire superficial será 3°C mayor que la del periodo 1961-90, como aumento más probable, aunque podría tener algún valor comprendido entre 1,3 y

4,5°C. Para las hipótesis B2, con menor aumento de la concentración de CO₂, la temperatura aumentaría unos 2,2°C (de 0,9 a 3,4°C). En la Fig. 5 se muestran los calentamientos previstos a nivel mundial para el supuesto A2, mostrados en una escala de colores. (Los rangos de las estimas también varían de unas zonas a otras, y se representan mediante isolíneas).

Los modelos acoplados Océano-Atmósfera necesitan de enormes recursos de potencia y tiempo de cálculo informático, y por eso no se han podido hacer simulaciones sobre todas y cada una de las hipótesis sobre emisiones futuras. Sin embargo, sí se han podido hacer ajustes a modelos más sencillos para que den resultados globales similares a los de los modelos más complejos, y con ellos se han realizado simulaciones para todas las posibilidades contempladas en los distintos

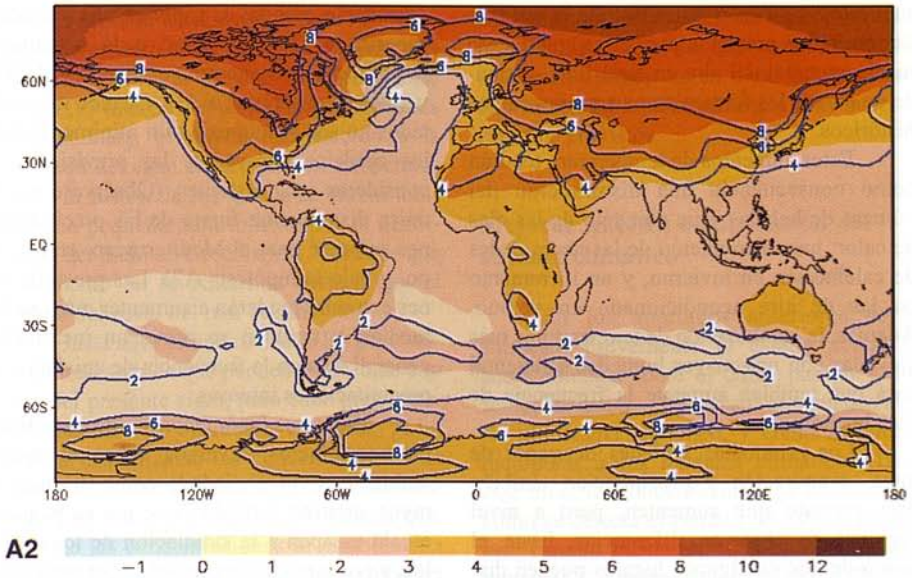


Fig. 5. Incremento de la temperatura media anual (escala de colores) del periodo 1961-90 al 2071-2100 y su rango (isolineas), para el supuesto A2 del SRES. (Unidades: °C. Según IPCC, 2001).
Fig. 5. Increment of the mean annual temperature (color shading) from 1961-90 to 2071-2100 and its range (isolines) for the SRES scenario A2. (Unit: °C. After IPCC, 2001).

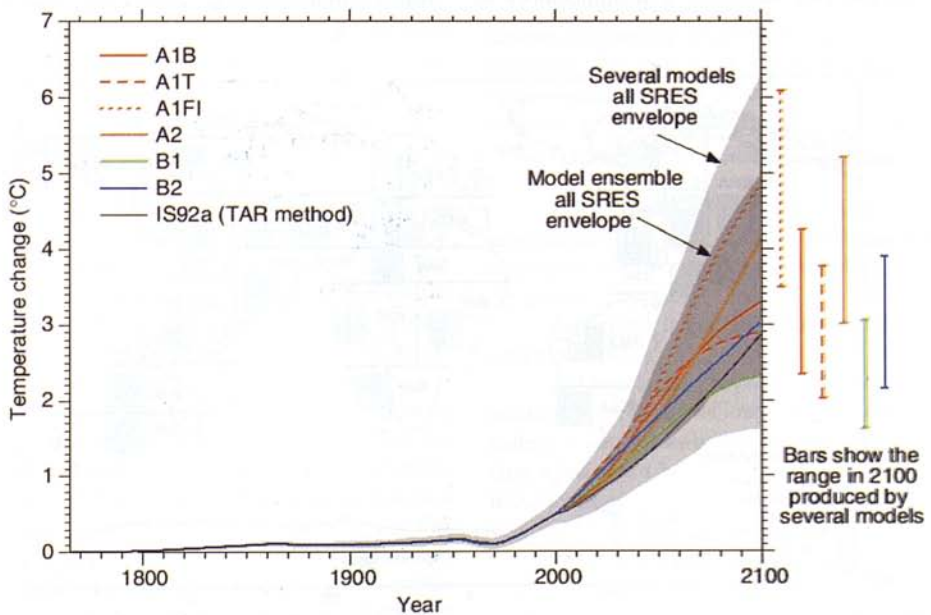


Fig. 6. Incrementos históricos y estimas futuras de la temperatura media global para distintos supuestos de emisiones. (Según IPCC, 2001).
Fig. 6. Historical and future projections of the global mean temperature for different emission scenarios. (After IPCC, 2001).

supuestos. La Fig. 6 muestra todo el abanico de resultados previstos para el calentamiento medio mundial del aire en superficie, teniendo en cuenta los forzamientos antropogénicos históricos.

Estos aumentos de temperatura tendrán como consecuencia una disminución del número de heladas y un aumento de las olas de calor; una disminución de las necesidades de calefacción en invierno, y un incremento en las de aire acondicionado en verano. Además, la combinación de temperaturas más elevadas con una mayor humedad ambiental hará que también aumente la frecuencia de días bochornosos.

Los promedios globales de vapor de agua, evaporación y precipitación también está previsto que aumenten, pero a nivel regional se observan diferencias, hasta el punto de que en algunos lugares pueden disminuir. En la Fig. 7 se ofrecen las previsiones que resultan de la intercomparación de 9 modelos diferentes, para los grupos de hipótesis A2 y B2, y para los meses de invierno y verano. Los aumentos o disminuciones se

consideran grandes si suponen una variación superior al 20% respecto a la actualidad, pequeños si se encuentran entre el 5 y el 20%, y nulos si no superan el 5%. Cuando los resultados no son similares en un mínimo de 7 de los modelos ensayados, las previsiones se consideran inconsistentes. (Obsérvese que la única disminución fuerte de las precipitaciones se prevé para el Mediterráneo, en invierno, y bajo la hipótesis A2). Las precipitaciones extremas tenderán a aumentar más que las medias, y también se prevé un incremento generalizado en la frecuencia de episodios de precipitaciones intensas.

Hay otros fenómenos de muy mal tiempo con efectos adversos sobre el medio ambiente y la sociedad, como tormentas, rayos, granizo, tornados, que por su pequeña escala escapan a la simulación de los modelos, y por tanto no se pueden hacer predicciones fundadas sobre si aumentarán o disminuirán sus frecuencias en el futuro.

Casquete polar, hielo marino, cobertura nival y glaciares continuarán en retirada en el hemisferio norte. En cambio la capa de hielo

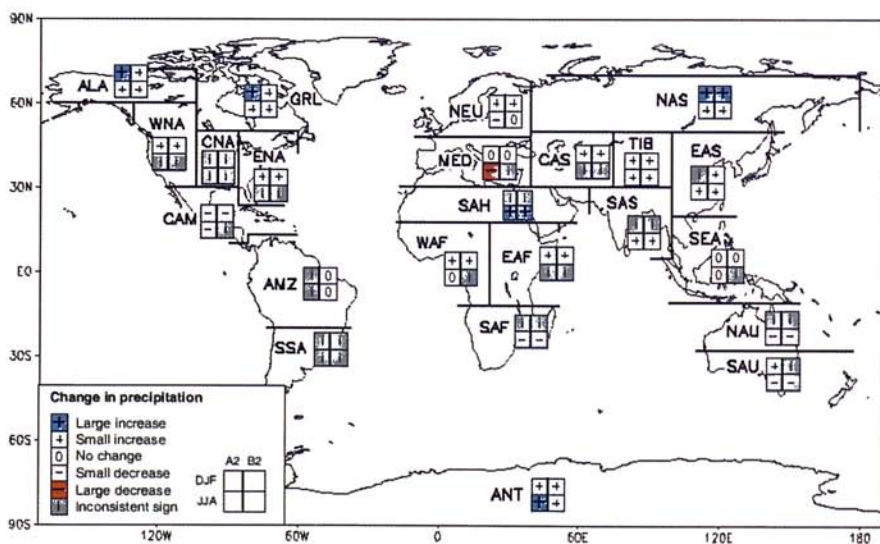


Fig. 7. Análisis de consistencia entre modelos de las previsiones de cambios regionales en la precipitación. (Según IPCC, 2001).

Fig. 7. Analysis of inter-model consistency in regional precipitation change. (After IPCC, 2001).

antártica tenderá a aumentar, como resultado de un incremento de la precipitación en aquel continente. El nivel del mar ascenderá entre 0,11 y 0,77 metros (según modelos e hipótesis de emisiones), principalmente debido a la dilatación del agua al aumentar su temperatura, y a la fusión de los glaciares. Habrá también una pequeña contribución por la disminución del hielo en Groenlandia, mientras que su aumento en la Antártida evitará que el ascenso del nivel del mar sea mayor.

Hasta aquí se han revisado las previsiones de los cambios que pueden tener lugar a lo largo del presente siglo, pero cabe preguntarse cómo será la evolución posterior. ¿Llegarán a estabilizarse las concentraciones de CO₂, o seguirán aumentando indefinidamente? Distintos estudios realizados indican que, para que las concentraciones se estabilicen a 450, 650 o incluso 1000 ppm, deberemos ser capaces de, al menos dentro de unas cuantas decenas de años, disminuir las emisiones antropogénicas a cantidades inferiores a las de 1990, mantenerlas así durante uno o dos siglos, y disminuirlas todavía más en el futuro. Y ello es debido a que, si bien los océanos tienen suficiente capacidad para absorber un 70 o 80% de las emisiones previstas, no lo pueden hacer con la velocidad suficiente, pues los procesos de mezcla y difusión a las aguas profundas son muy lentos y necesitan siglos para resultar efectivos. Por tanto, para que las concentraciones atmosféricas de CO₂ se mantengan constantes a partir del año 2300 es necesario que las emisiones descendan hasta equilibrarse con la velocidad de absorción por los sumideros del ciclo del carbono.

Por su parte, la temperatura media global continuará aumentando durante cientos de años a razón de unas décimas de grado cada siglo, incluso después de que las concentraciones de CO₂ se hayan estabilizado, debido a la inercia térmica de los océanos (Fig. 8). Por el mismo motivo, el nivel del mar continuará elevándose paulatinamente durante siglos sucesivos, hasta alcanzar de 0,5 a 2 m sobre el nivel actual si la concentración de CO₂ se estabiliza en el doble de la preindustrial, o de 1 a 4 m si se cuadruplica. La Antártida y Gro-

enlandia contienen suficiente hielo como para hacer subir el nivel del mar casi 70 metros si se llegara a fundir en su totalidad, pero para ello harían falta calentamientos muy superiores a los previstos.

Mejorar nuestra comprensión del sistema climático

En los apartados anteriores se ha expuesto brevemente el estado actual de conocimientos sobre el clima pasado y presente, los factores y procesos que pueden alterar el sistema climático, y cómo se pueden incorporar a los modelos climáticos. Dado este nivel de conocimientos, se ha mostrado cómo se detecta el cambio climático, y cómo este cambio puede atribuirse a la influencia humana. Y, con las mejores herramientas disponibles hoy día, se han hecho previsiones de cómo puede cambiar el clima en el futuro para diferentes hipótesis de emisiones de gases con efecto invernadero.

Sin embargo, todavía quedan muchas lagunas en nuestra comprensión del cambio climático, que dan lugar a notables incertidumbres. Para mejorar el conocimiento de los procesos implicados y su posible evolución, es necesario avanzar en nueve grandes áreas:

1. Mejorar la cobertura de las redes de observación. De lo contrario no se podrá detectar el cambio climático en amplias áreas del globo.
2. Mejorar la calidad y longitud de las series climáticas.
3. Mejorar las proyecciones futuras de emisiones y concentraciones de gases invernadero y aerosoles, prestando especial atención a los ciclos biogeoquímicos y a las distribuciones espacio-temporales de las fuentes y sumideros de CO₂.
4. Caracterizar mejor los procesos dominantes (mezcla oceánica, etc.) y las retroalimentaciones (de las nubes, del hielo marino, etc) en la atmósfera, biosfera, superficies terrestre y marina, y océanos profundos.

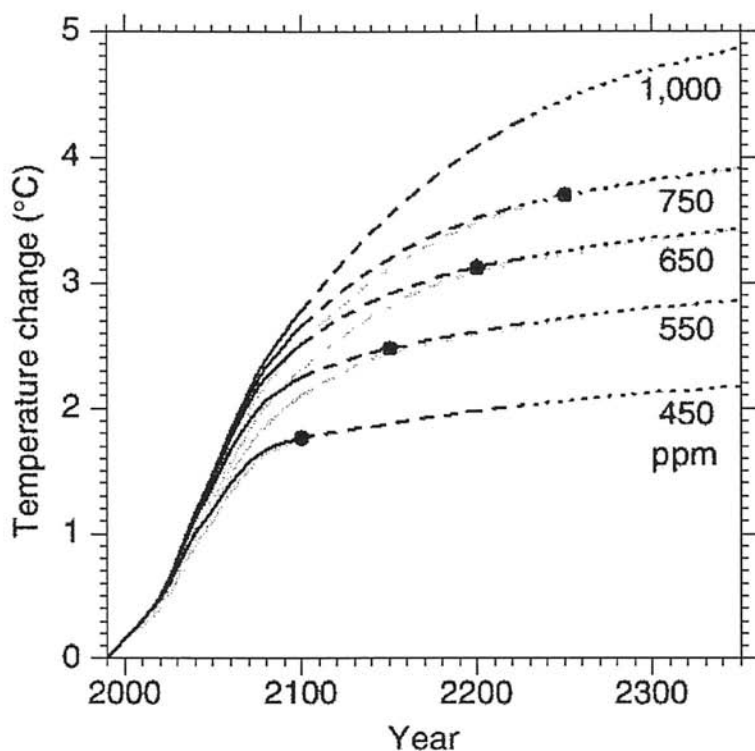


Fig. 8. Aumentos previstos de la temperatura media global a largo plazo para distintos niveles de estabilización de las concentraciones de CO₂. (Según IPCC, 2001).

Fig. 8. Projected global mean temperature increments for different stabilized CO₂ concentration levels. (After IPCC, 2001).

5. Estudiar más ampliamente los patrones de variabilidad climática a largo plazo.

6. Explorar más a fondo el carácter probabilístico de los estados climáticos futuros mediante múltiples conjuntos de simulaciones numéricas.

7. Mejorar la integración de modelos regionales y globales para conseguir mejores previsiones de impactos regionales y episodios de tiempo extremado.

8. Acoplar de modo más formal los modelos del sistema climático con modelos del sistema humano, para poder contar así con una base para una más amplia exploración de

posibles patrones causa-efecto-causa que relacionen los componentes humanos y no humanos del sistema global.

9. Acelerar el progreso internacional en la comprensión del sistema climático mediante el fortalecimiento de las relaciones internacionales necesarias para coordinar esfuerzos nacionales e institucionales, de modo que los recursos de investigación, computacionales y observacionales puedan ser usados lo mejor posible para el interés general.

Agradecimientos

Hasta aquí la síntesis del resumen técnico del Tercer Informe del Grupo de Trabajo I del IPCC, del que se han tomado todos los datos y figuras mostrados, así como casi todo el texto (traducido libremente). Con este resumen se ha pretendido ofrecer una primera aproximación a dicho trabajo, con la intención de animar a los lectores a ampliar estos datos mediante la consulta del trabajo original, o incluso de los informes completos de

este y de los demás grupos de trabajo del IPCC.

Bibliografía

IPCC, 2001. *Technical Summary of the Third Assessment Report*. IPCC Working Group I, 63 pp. (Actualmente disponible en: <http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf>).